

ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ МОДЕЛИ ПРИВОДА МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЕ

Аннотация. В статье рассматривается влияние параметров матрицы измерения на идентифицируемость модели привода на базе двигателя постоянного тока для задач управления и диагностики. Для исследования влияния матрицы измерения на идентифицируемость модели разработана векторно-матричная модель привода в пространстве состояний с учетом вязкого трения. Модель разработана в российской системе модельно-ориентированного проектирования функционального программного обеспечения систем автоматического управления SimInTech. Так как регулятор привода должен обеспечивать регулирование по скорости вращения, то в качестве обобщенных координат выбраны электрический ток и угловая скорость вращения якоря. Управлением являются напряжение на обмотке якоря. Матрица измерения определяется классом измерительных приборов. В качестве выходных параметров модели используются электрический ток и напряжение. Показано, что при некотором пороговом значении точности измерительных приборов модель привода становится неидентифицируемой, что приводит к потере управляемости и невозможности диагностирования.

Ключевые слова: привод, идентифицируемость, мехатронное устройство, модель, двигатель постоянного тока, управление, диагностика.

Введение

В настоящее время широкое распространение получает концепция управления на базе модельного подхода. Для исследования приводов мехатронных устройств (МУ) выбран математический аппарат на базе векторно-матричных моделей в пространстве состояний во временной области, т.к. он имеет следующие достоинства: удобство обозначений, компактность записи в векторно-матричной форме, простота проведения анализа и наглядность.

Методы анализа и синтеза моделей в пространстве состояний в векторно-матричной форме имеет существенное преимущество перед операторными методами в том, что они сравнительно легко распространяются на широкий класс технических систем, например, на системы с переменными во времени параметрами, которые изменяются под воздействием дефектов. Метод идентификации в пространстве состояний активно развивался за последние два десятилетия и был успешно реализован во многих отраслях промышленности. Исследования в данном направлении представлены в работах [1-16]. Результаты данных исследований облегчают проектирование систем управления и диагностики технических объектов и повышают их эффективность.

Постановка проблемы или задачи в общем виде

Под идентифицируемостью понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта. В качестве объекта рассматривается привод МУ, где происходит взаимодействие подсистем с разной физической природой – механической, электрической, электронной и электромеханической. МУ работают в автономном режиме, иногда в экстремальных условиях. Для обеспечения их высокой надежности требуется эффективная система диагностики. Для решения задач диагностики предлагается определение идентифицируемости привода МУ. Необходимо определить пороговое значение класса точности измерительных приборов, при котором модель привода МУ становится неидентифицируемой, что приводит к потере управляемости и невозможности диагностирования.

Анализ достижений и публикаций, в которых предлагается решение данной проблемы

Метод идентификации в пространстве состояний активно развивается за последние два десятилетия и был успешно реализован во многих отраслях промышленности. Одним из первых П. Эйкхофф выполнил теоретические обоснования идентификации, разработал алгоритмы и способы идентификации [1,2]. Исследованию идентификации динамических систем посвящены работы следующих авторов: Д. Гроппа [3], Л. Льюнга [4], Э.П. Сэйджа и Дж.Л. Мелсы [5,6], а среди отечественных авторов – Я.З. Цыпкина [7], Н.С. Райбмана [8], Ш.Е. Штейнберга [9] и др. Р. Беард разработал схему обнаружения дефектов на основе наблюдателей [10]. Джонс продолжил данные исследования и разработал фильтр обнаружения дефектов Беарда-Джонса (Beard-Jones Fault Detection Filter) [11]. В 1980-е и начале 1990-х годов были разработаны основные подходы к количественной диагностике: подход, основанный на наблюдателях, метод оценки параметров и т. д. Некоторые важные работы в этом направлении – Франк [12], Исерманн [13], Басвиль и Никифоров [14]. Разработанные методики хорошо теоретически обоснованы и являются классическими методиками диагностики. Эти методики основаны на аналитической избыточности, которая представляет собой модель, описывающую диагностируемую техническую систему. В работе [15,16] рассмотрены вопросы диагностирования приводов мобильных роботов на базе модели двигателя постоянного тока в пространстве состояний. Во всех исследованиях считается, что измерение выходных параметров модели выполняется без погрешности. Настоящее исследование позволит определить класс точности измерительных приборов, позволяющих выполнять идентификацию модели.

Математическая модель привода на базе двигателя постоянного тока

Представим векторно-матричную модель МУ в пространстве состояний в классическом виде

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$y = Cx + Du, \quad (2)$$

где A - матрица состояния,

B - матрица управления,

C, D – матрицы измерения,

x - вектор состояния.

Запишем известную векторно-матричную модель двигателя постоянного тока (ДПТ) в виде (1), (2). Определим входной сигнал нагрузки $M_H = k_{c_mp} \text{sign} \omega$, можно получить линейную модель:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_M}{J} & -\frac{k_{e_mp}}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ M_H \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x, \quad (4)$$

хотя, строго говоря, при переменной нагрузке и переменном моменте торможения модель не линейна. Пусть матрица измерения C определяет точность информационно-измерительной системы, а матрица D равна нулю. Тогда (3) и (4) запишем как

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_M}{J} & -\frac{k_{e_mp}}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ M_H \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$y = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \zeta & 0 \\ 0 & 1 + \zeta \end{bmatrix} x, \quad (6)$$

где

$$x = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix},$$

$$a_{11} = -R_{\text{я}}/L_{\text{я}}, a_{12} = -k_{\text{е}}/L_{\text{я}}, a_{21} = k_{\text{м}}/J, a_{22} = -k_{\text{в_тр}}/J.$$

$$b_{11} = 1/L_{\text{я}}, b_{12} = -1/J.$$

$$c_{12} = c_{21} = 0, c_{11} = c_{22} = 1 + \zeta.$$

Здесь ζ – относительная точность измерителя. Для простоты вычисления соотношений относительная точность ζ выбрана равной для всех компонент вектора состояния.

Выберем двигатель ДПП-11У4 с параметрами:

- номинальная мощность 0,3 кВт;
- номинальное напряжение 220 В;
- номинальный ток двигателя 2 А;
- сопротивление двигателя при 15°C 14.6 Ом;
- номинальная частота вращения 1500 об/мин;
- индуктивность двигателя 0.248 Гн;
- момент инерции якоря двигателя 0,0031 кг·м²;
- коэффициент вязкого трения 0.001 Н·м·с.

Для разработки модели привода в пространстве состояний в векторно-матричной форме составлены дифференциальные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в ДПТ с независимым возбуждением или с постоянными магнитами:

$$u_{\text{я}} = R_{\text{я}} \left(T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}, \quad (7)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_{\text{н}}, \quad (8)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (9)$$

$$e_{\text{я}} = k_{\text{е}}\omega_m, \quad M = k_{\text{м}}i_{\text{я}}, \quad (10)$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R}, \quad (11)$$

где $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$ – напряжение, ток и противо ЭДС якоря ДПТ,

$L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}}$ – индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря ДПТ,

$\omega_m, M, \omega_{\text{я}}, M_{\text{н}}, \theta_m$ – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала ДПТ,

J – момент инерции ротора ДПТ и нагрузки.

Коэффициенты $k_{\text{е}}, k_{\text{м}}$ являются конструктивными постоянными двигателя.

Уравнение (7) отражает взаимосвязь между переменными в цепи якоря. Уравнение (8) отражает условия механического равновесия.

Номинальный момент двигателя в (Н·м), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{30 P_{\text{н}}}{\pi n_{\text{н}}}, \quad (12)$$

$$k_{\text{м}} = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{я}}}, \quad (13)$$

$$k_{\text{е}} = \frac{30 (U_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}})}{\pi n_{\text{н}}}, \quad (14)$$

$$L_{\text{я}} \approx \frac{30 U_{\text{я}} c_x}{\pi n_{\text{н}} I_{\text{я}}}, \quad (15)$$

где $c_x = 0.3-0.4$ – эмпирический коэффициент, n измеряется в об/мин., ω – рад./с.

В качестве вектора состояния выбраны ток якоря I и частота вращения якоря ω . Напряжение на якоре $U_{\text{я}}$ обеспечивает регулирование в системе.

Учтено вязкое и сухое трение

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{в_мп}}\omega - k_{\text{с_мп}}\text{sign}\omega \quad (16)$$

Для модели привода мехатронного устройства на базе ДПТ получены следующие дифференциальные уравнения первого порядка:

$$L_{я} \frac{dI_{я}}{dt} = -R_{я} I_{я} - k_e \omega + U_{я} \quad (17)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_M I_{я} - k_{e,mp} \omega - M_H \quad (18)$$

В уравнении (18) учтено из (16) вязкое и сухое трение в виде $k_{e,mp} \omega - M_H$.

Большинство параметров являются переменными, а два параметра ($L_{я}, J$) – постоянные.

Переменной так же является матрица C измерений вектора состояния.

Известно, что идентифицируемость определяется рангом расширенной матрицы $rank[C_k^T A_k^T (A_k^T)^2 C_k^T \dots (A_k^T)^{n-1} C_k^T]$, где k – шаг моделирования.

Матрица C_k^T полностью определяется информационно-измерительной системой МУ, т.е. относительной ошибкой измерения (классом точности измерительного прибора). Запишем модель информационно-измерительной системы для ДПТ в виде

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \zeta & 0 \\ 0 & 1 + \zeta \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (19)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 + \zeta & 0 \\ 0 & 1 + \zeta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

Будем считать, что матрица $\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}_k^{-1}$ на каждом шаге k не изменяется, определяется информационно-измерительной системой, может быть представлена в данной модели как

$$\begin{bmatrix} \hat{I} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + h\xi & 0 \\ 0 & 1 + h\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где h – относительная ошибка измерения, выражаемая в долях единицы,

ξ – реализация нормально распределенной случайной величины \mathcal{E} со

среднеквадратическим отклонением $\sigma = \frac{h}{3}$.

Тогда для максимальных ошибок в меньшую сторону в наихудшем случае для всех измерительных каналов, учитывая непрерывный и бесконечный характер реализации нормально распределенной случайной величины, предполагающей, что большинство значений входят в интервал $3\sigma \leq \xi \leq 3\sigma$, что означает $\xi = -1$, можем приблизительно записать

$$\begin{bmatrix} \hat{I} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - h & 0 \\ 0 & 1 - h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Исходя из анализа данного выражения, можем сделать вывод о том, что относительная ошибка h является критической для идентифицируемости модели мехатронного устройства, так как $\det(C^{-1}) = (1 - h)^2 = 1 - 2h + h^2$, а значит при больших относительных ошибках h определитель $\det(C^{-1})$ стремится к нулю, что может привести к неидентифицируемости системы даже при хорошо определенной матрице состояния A .

Исследуем влияние матрицы измерения на ошибки управления мехатронным устройством.

Математическая модель привода на базе двигателя постоянного тока

На рисунке 1 показана схема вычисления выходных параметров модели при различной точности измерения вектора состояния мехатронного устройства в векторно-матричной форме с блоком «Переменные состояния» в среде динамического моделирования технических систем SimInTech, российской системе модельно-ориентированного проектирования функционального программного обеспечения систем автоматического управления.

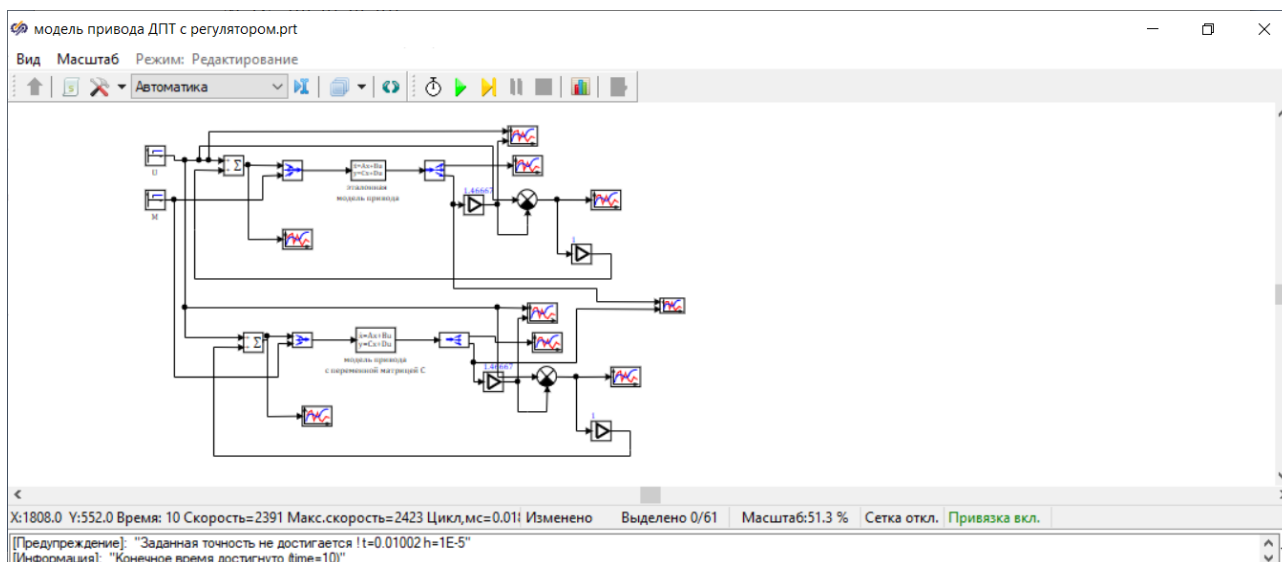


Рисунок 1 – Модель привода ДПТ с эталонной и изменяемой измерительной матрицей с П-регулятором

```

// программа моделирования SimInTech
const delta=1, ke1=1.21, km1=0.95, J1=0.0031, R1=14.6, L1=0.248, k1=0.001, J2=J1, R2=R1*delta, L2=L1,
k2=k1, ke2=ke1, km2=km1;
initialization
// Формирование матриц
M_A1=[[-R1/L1,-ke1/L1],[km1/J1,-k1/J1]];
M_B1=[[1/L1,0],[0,-1/J1]];
M_C1=[[1, 0], [0, 1]];
M_D1=[[0,0], [0, 0]];
M_A2=[[-R2/L2,-ke2/L2],[km2/J2,-k2/J2]];
M_B2=[[1/L2,0],[0,-1/J2]];
M_C2=[[0.9, 0], [0, 0.9]];
M_D2=[[0, 0], [0, 0]];
// Транспонирование матриц
M_A1=transp(M_A1);
M_B1=transp(M_B1);
M_C1=transp(M_C1);
M_D1=transp(M_D1);
M_A2=transp(M_A2);
M_B2=transp(M_B2);
M_C2=transp(M_C2);
M_D2=transp(M_D2);
end;

```

Результаты моделирования при моменте $M=1.91$ Н, относительной ошибке измерения $h1=0$ (эталонная измерительная матрица без ошибок измерения), $h2=0.1$ (измерительная матрица при наличии относительной ошибки измерения 0.1) представлены на рисунке 2.

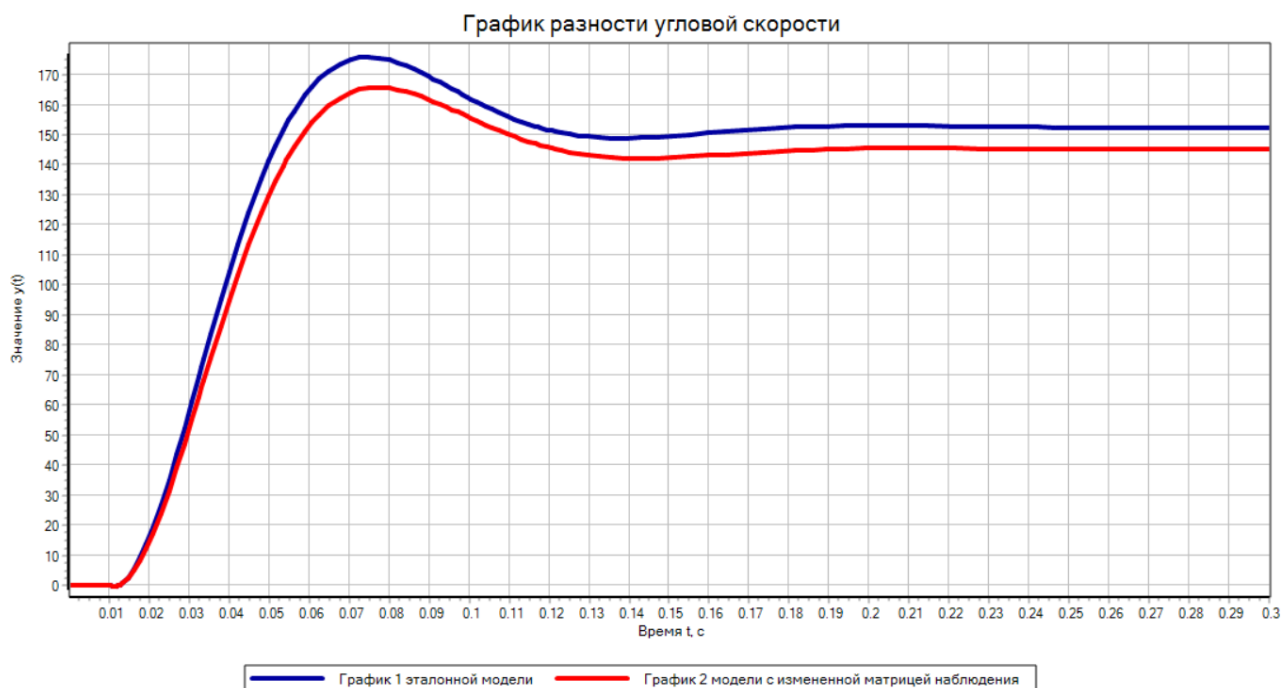


Рисунок 2 – Результаты моделирования при $M=1.91$ Н, $h_1=0$ (эталонная измерительная матрица), $h_2=0.1$ (изменяемая измерительная матрица)

Результаты моделирования при моменте $M=1.91$ Н, относительной ошибке измерения $h_1=0$ (эталонная измерительная матрица без ошибок измерения), $h_2=0.5$ (измерительная матрица при наличии относительной ошибки измерения 0.5) представлены на рисунке 3.

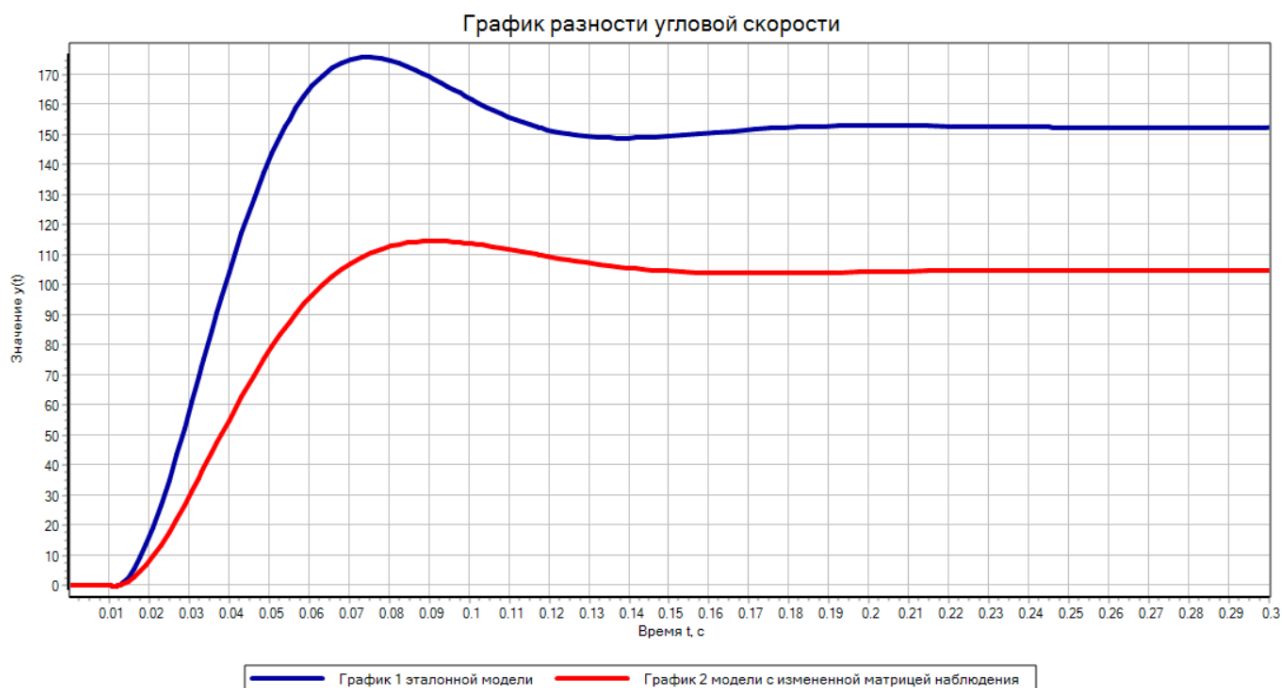


Рисунок 3 – Результаты моделирования при $M=1.91$ Н, $h_1=0$ (эталонная измерительная матрица), $h_2=0.5$ (изменяемая измерительная матрица)

На рисунке 4 показана зависимость относительной разности угловых скоростей эталонной модели и модели с измененной матрицей измерения.

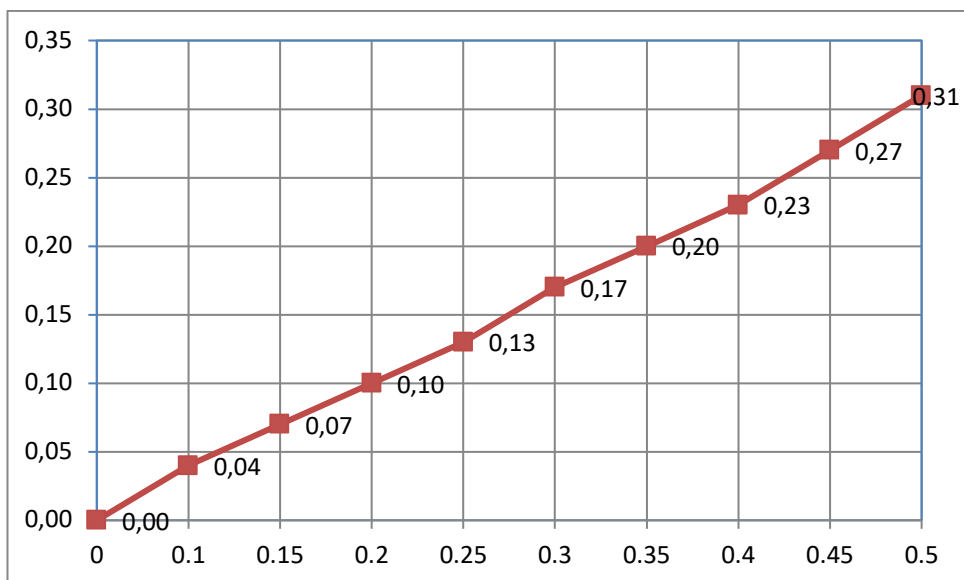


Рисунок 4 – Зависимость относительной разности угловых скоростей эталонной модели и модели с измененной матрицей наблюдения (ось абсцисс – h , ось ординат – относительная разность угловых скоростей)

Зависимость квадрата отклонений угловых скоростей эталонной модели и модели с измененной матрицей наблюдения показаны на рисунке 5.

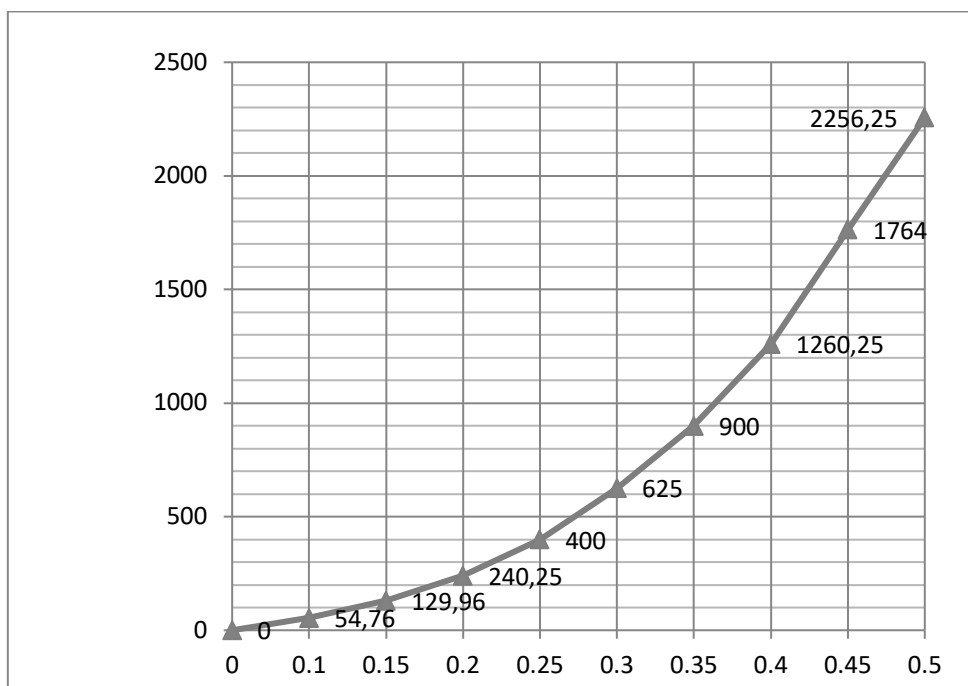


Рисунок 5 – Зависимость квадрата отклонений угловых скоростей эталонной модели и модели с измененной матрицей наблюдения (ось абсцисс – h , ось ординат – квадрата отклонений угловых скоростей)

Выводы

В статье исследовано влияние параметров матрицы измерения на идентифицируемость модели привода МУ на базе двигателя постоянного тока для задач управления и диагностики.

Показано, что при пороговом значении $h > 0.2$ матрицы измерения разность угловых скоростей эталонной модели и модели с измененной матрицей наблюдения составляет более 10%, модель привода становится неидентифицируемой, что приводит к потере управляемости и невозможности диагностирования. Для исследования влияния матрицы измерения на идентифицируемость модели разработана векторно-матричная модель привода в пространстве состояний с учетом вязкого трения.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта для учёных ФГБОУ ВО "ИжГТУ имени М.Т. Калашникова" 15.04.06/18 ТЮВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 686 с.
2. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
3. Гроп, Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
4. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
5. Сейдж, Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
6. Сейдж, Э.П., Мелс Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. – М.: Связь, 1976. – 496 с.
7. Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
8. Райбман, Н.С. Что такое идентификация? – М.: Наука, 1970. – 118 с.
9. Штейнберг, Ш.Е. Идентификация в системах управления. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 80 с.
10. Beard, R.V. Failure accommodation in linear system through selfreorganization (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA. 1971. 376 p.
11. Jones, H.L. Failure detection in linear systems (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA. 1973. 459 p.
12. Frank, P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy: a survey and some new results. Automatica, Vol. 26, No. 3, pp. 459–474, 1990. – Pp. 459–474.
13. Isermann, R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin; New York: Springer. 2006.
14. Basseville, M., Nikiforov, I.V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Prentice Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, N.J.:Prentice Hall.1993.
15. Trefilov, S., Nikitin, Y. Automatic warehouses with transport robots of increased reliability, ActaLogistica, Vol. 5, No. 3, pp. 19–23, 2018.
16. Никитин, Ю.Р., Трефилов, С.А., Абрамов, А.И., Абрамов, И.В., Турыгин, Ю.В., Романов, А.В. Диагностирование приводов мобильных роботов на базе модели двигателя постоянного тока // Интеллектуальные системы в производстве, 2018, Том 16, №4. – С.114–121. ISSN 1813-7911. DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-114-121

Никитин Юрий Рафаилович, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова», канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Мехатронные системы», 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, +79068164399, nikitin@istu.ru	Трефилов Сергей Александрович, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова», канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Мехатронные системы», 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, +79124418013, trefilov376908@gmail.com	Никитин Евгений Васильевич, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова», магистрант, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, +79508256124, nikitinevgeniy96@gmail.com
--	--	--

Yu.R. NIKITIN, S.A. TREFILOV, E.V. NIKITIN

IDENTIFICABILITY OF THE MECHATRONIC DEVICE DRIVE MODEL ON THE DC MOTOR BASIS USING MEASURING MATRIX

Abstract. The article discusses the influence of measurement matrix parameters on the identifiability of a drive model based on a DC motor for control and diagnostics tasks. To study the influence of the measurement matrix on the identifiability of the model, a drive vector-matrix model has been developed in the state space taking viscous friction into account. The model was developed in the Russian system of model-oriented design of functional software for automatic control systems – SimInTech. Since the drive regulator must provide speed control, the current and the angular velocity of rotation of the armature are chosen as the generalized coordinates. The control is the voltage on the armature winding.

The measurement matrix is determined by the class of measuring devices. The output parameters of the model are electric current and voltage. It is shown that at a certain threshold value of measuring instrument accuracy, the drive model becomes unidentifiable, which leads to loss of controllability and impossibility of diagnosing.

Keywords: drive, identifiability, mechatronic device, model, DC motor, control, diagnostics.

References

1. Jejkhoff, P. *Osnovy identifikacii sistem upravlenija*. (Fundamentals of identification control systems), Moscow, Mir, 1975, 686 p. (in Russian)
2. Jejkhoff, P. *Sovremennye metody identifikacii sistem*. (Modern methods of system identification), Moscow, Mir, 1983, 400 p. (in Russian)
3. Grop, D. *Metody identifikacii sistem*. (Identification methods of system), Moscow, Mir, 1979, 302 p. (in Russian)
4. L'jung, L. *Identifikacija sistem. Teorija dlja pol'zovatelja*. (System identification. Theory for the user), Moscow, Nauka, 1991, 432 p. (in Russian)
5. Sejdzh, Je.P., Melsa, Dzh.L. *Identifikacija sistem upravlenija*. (Identification of control systems), Moscow, Nauka, 1974, 248 p. (in Russian)
6. Sejdzh, Je.P., Melsa, Dzh.L. *Teorija ocenivaniya i ee primenenie v svjazi i upravlenii*. (Evaluation theory and its application in communication and management), Moscow, Svjaz', 1976, 496 p. (in Russian)
7. Cypkin, Ja.Z. *Osnovy informacionnoj teorii identifikacii*. (Fundamentals of identification information theory), Moscow, Nauka, 1984, 320 p. (in Russian)
8. Rajbman, N.S. *Chto takoe identifikacija?* (What is identification?), Moscow, Nauka, 1970, 118 p. (in Russian)
9. Shtejnberg, Sh.E. *Identifikacija v sistemah upravlenija*. (Identification in control systems), Moscow, Jenergoatomizdat, 1987, 80 p. (in Russian)
10. Beard, R.V. *Failure accommodation in linear system through selfreorganization* (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1971, 376 p.
11. Jones, H.L. *Failure detection in linear systems* (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1973, 459 p.
12. Frank, P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, vol. 26, issue 3, 1990, pp. 459–474.
13. Isermann, R. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Berlin; New York, Springer, 2006, 475 p.
14. Basseville, M., Nikiforov, I.V. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, N.J.:Prentice Hall, 1993, 447 p.
15. Trefilov, S., Nikitin, Y. Automatic warehouses with transport robots of increased reliability, *ActaLogistica*, Vol. 5, No. 3, pp. 19-23, 2018.
16. Nikitin YU.R., Trefilov S.A., Abramov A.I., Abramov I.V., Turygin YU.V., Romanov A.V. *Diagnostirovanie privodov mobil'nyh robotov na baze modeli dvigatelya postoyannogo toka*. (Diagnosing drives of mobile robots based on a DC motor model). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2018, Vol. 16, No 4, pp.114–121. ISSN 1813-7911. DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-114-121 (in Russian)

<p>Nikitin Yuri Rafailovich, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, CSc, Assoc. prof., Associate Professor of the Department "Mechatronic Systems", 426069, Studencheskaya str, 7, Izhevsk, Russia, +79068164399, nikitin@istu.ru</p>	<p>Trefilov Sergey Alexandrovich, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, CSc, Assoc. prof., Associate Professor of the Department "Mechatronic Systems", 426069, Studencheskaya str, 7, Izhevsk, Russia, +79124418013, trefilov376908@gmail.com</p>	<p>Nikitin Evgeny Vasilyevich, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, master student, 426069, Studencheskaya str, 7, Izhevsk, Russia, +79508256124, nikitinevgeniy96@gmail.com</p>
---	--	---